

# 汽車鋁合金輪圈輕量化之研究

\*蘇嘉祥、陳肇文

南臺科技大學機械工程系

\*jssu@stust.edu.tw

## 摘要

汽車輪圈的結構關係到汽車行進的穩定性與油耗表現，在應有的結構強度下，輕量化已是目前發展的趨勢，本研究針對市售之汽車輪圈為主題，藉由逆向工程技術將原型3D圖形重建與誤差比對，再透過輪輻之設計變更，以靜態進一步分析整體輪輻之結構強度變化，研究發現輪輻數量的變化(5支減至4支)，在相同負荷下，其等效應力會由8.90 MPa增加至11.59 MPa(材料之降伏應力為275 MPa)，對整體重量約可減少4.4%，但當輪輻數量降至3支時，其最大等效應力點即會產生移動，而面臨輪圈承載力不足的問題，為求最佳化及具應有之輪圈強度，本文之研究分析，可提供汽車輪圈在輕量化的發展上更多有利的研發參考依據，進而發展更輕、安全與堅固之汽車輪圈。

**關鍵詞：**逆向工程技術、輪圈、輪輻、等效應力

## An Investigation into the Lightweight of Aluminum Alloy Wheel

\*Chia-Hsiang Su, Chao-Wen Chen

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

### Abstract

From the rim's structural relationship to stability and fuel consumption of a car, under proper structural strength, lightweight is the current trend of development. This study focuses on commercially available car wheels. By reverse engineering reconstruction 3D graphics, the design changes of the hub, and further analysis of structural changes in the overall strength of the hub, the study found out, under the same load, if the quantity the hub is changed from five to four, the von-Mises stress will increase from 8.90 MPa to 11.59 MPa (Yield stress of substrates is 275MPa), but the overall weight can be reduced by 4.4%. But when the number of wheel hub is down to three, the maximum stress point will move, and a car will face the problem of insufficient bearing capacity of the rim. In order to optimize strength and lightweight wheel, the analysis of this paper can provide more favorable references for the development of a lighter, safer and sturdier wheel of a car.

**Keywords :** Reverse Engineering, Rim, Hub, Von-Mises Stress

## 壹、前言

台灣製造輪圈的歷史算起步很早，但早期因資金與技術的不足，所投入的都是以技術門檻相對較低的自行車輪圈做起，隨著經濟的起飛與競爭者眾，相關的業者不得不觸及產值較高，但技術較為複雜的汽車輪圈的領域，且材料也由過去的鋼鐵圈轉為目前常見的鋁合金圈，尤其是部分製程改變為鍛造為主[1-2]，而輪圈材料的轉變正也是為了在合適的強度下，提供市場更多的選擇，使產業依然保有製造的優勢與競爭力。但隨著材料轉變後，其製造方式亦會受影響而需修正，以鍛造鋁圈而言，即是先透過尺寸設計、強度分析與製程規劃所產出之製品，但製造商往往在製造方式的考量下，常忽略了輪圈輕量化與美觀的問題。

根據研究顯示[3-5]，車輪會由鋼圈轉變為鋁合金，是欲藉由材料質量的不同來降低輪的重量，用以提高車輛的驅動性與減少燃料的消耗，在汽車減重的發展上，業界常稱「簧下1公斤，簧上15公斤」，亦即在懸吊系統以下的重量能減少1公斤的情形下，等於車上可減少15公斤，以四個懸吊系統而言，整體車子的重量約可減少60公斤的重量，可有效提升車子油耗的表現，足見輪圈的輕量化有其重要與迫切性。

本研究擬以鋁合金輪圈為分析對象，藉由逆向工程技術重建輪圈原始圖檔[6]，並在SAE J175的規範下[7-9]，以有限元素套裝軟體ANSYS[10]，模擬計算輪圈在承受負載的情形下，分析整體輪圈所受之等效應力與殘留變形量結果，並以輪輻數與輪輻側面厚度為調整因子，進一步探討減重設計對輪圈強度的影響，以提供符合製造成本及減輕輪圈重量之設計，並能兼具安全性、合理性與美觀之目標。

## 貳、實驗方法

為使分析探討結果更具合理性與準確性，本研究之輪圈3D圖將以市售之輪圈為主，如圖1所示，透過逆向工程技術進行重建，以3D非接觸式藍光掃描儀(wenzel mobile scan 3D)取得完整的輪圈點資料，如圖2所示，再以Unigraphics NX進行以曲面切割的方式將多餘的部分實體切除，如圖3(a)~(d)所示，完成曲面切割，再將其他細節特徵例如：拔模特徵、導圓角、圓孔等進行後續處理重新編繪3D模型圖檔，如圖4所示，並將編繪之零件進行誤差分析，以確保重新編繪之3D圖與實際輪圈尺寸相符，如圖5所示。

在有限元素分析的應用領域中，結構分析可分為靜態結構分析(static structural analysis)與瞬態結構分析(transient structural analysis)等，以上各類分析皆有相應的電腦輔助工程分析軟體(CAE)可進行數值分析的應用，ANSYS視為較常見分析軟體之一，其功能主要可分為三個階段模組，分別為前處理模組(pre-processing module)、分析求解器(solution processor)與後處理模組(post-processing module)，因此，為進一步了解輪圈受力時之應力分佈情形，研究中將藉由有限元素套裝軟體ANSYS進行分析，同時在輪圈SAE的規範下，使用常見的鋁合金6061-T6做為輪圈材質，材料性質相關參數，如表1所示。



圖1 鋁合金輪圈原型

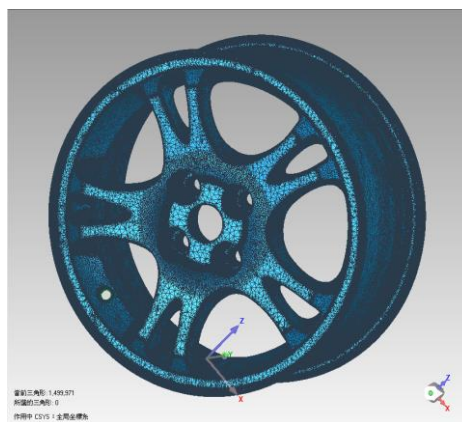


圖2 點資料轉換為三角網格

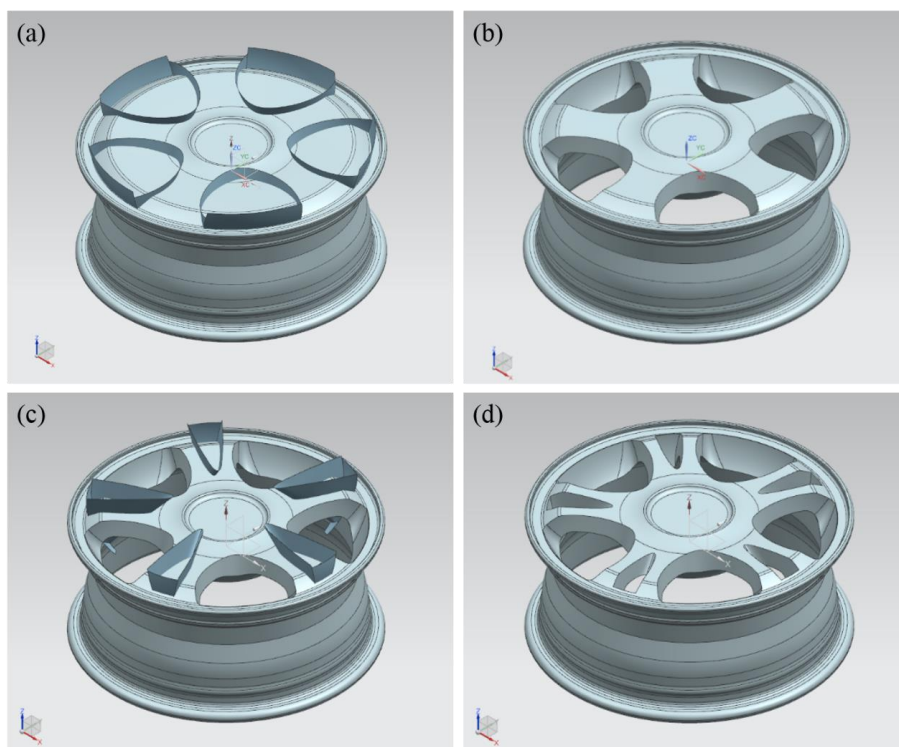


圖3 利用曲面進行實體剪裁(a)(c)陣列缺口曲面 (b)(d)曲面修剪

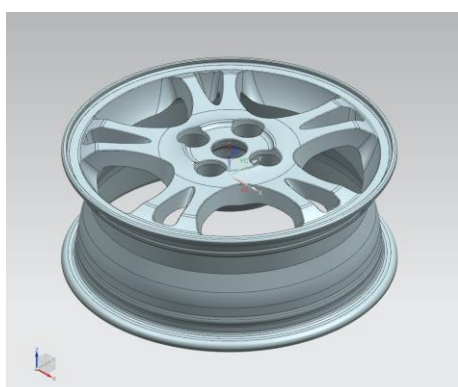


圖4 3D實體模型重建

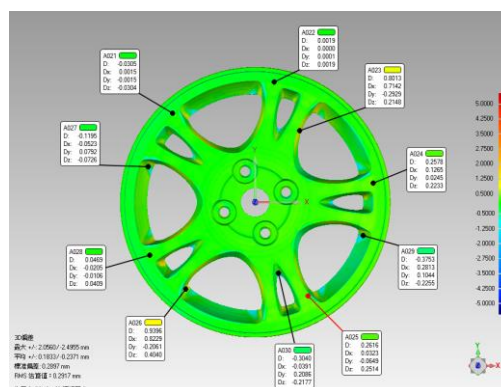


圖5 3D掃描資料與重建之3D圖誤差比對分析  
(平均誤差(RMS)為：0.2917 mm)

表1 輪圈設定6061-T6鋁合金之材料性質表

材料性質	數值	單位
彈性模數(楊氏係數)	69	GPa
蒲松比	0.33	
剪力模數	26000	N/mm <sup>2</sup>
質量密度	2700	Kg/m <sup>2</sup>
抗拉強度	310	MPa
降伏強度	275	MPa
膨脹係數	2.36e-005	/°C
熱傳導率	166.9	W/(m-K)
比熱	896	J/(Kg-K)

另外，在SAE規範中強調，輪緣與中心螺絲固定位置為輪胎及傳動軸配合位置，尺寸皆有一定的標準不可任易變動，因此針對輪輻的數量以及外型做為減重的設計變更因子，預期將可達到最有效的減重成果，相關參數如表2所示。而為確保在輕量化下亦能符合結構強度之要求，研究中所分析出的最大應力結果將與6061-T6鋁合金降伏強度進行比對，以設計出在輕量化下符合產品功能最適合之尺寸參數。

表2 輪圈設計變更參數表

參數名稱	參數範圍
輪輻數量	5支(原型)、4支、3支
輪輻側面厚度	21 mm、11 mm

## 參、結果與討論

輪圈之模擬分析各邊界條件為固定輪圈輪緣之六個自由度，且施力點位於輪圈中心的四個螺絲孔-Y方向，負載條件則以700 kgf(6864.7 N)靜態重力對輪圈進行收斂分析，再依輪圈受力的情形下分析總變形量、von-Mises應力及應力集中位置等變化之情形。

### 一、5支輪輻(原型)之結構應力分析

由輪圈的原始設計尺寸與輪輻數量而言(5支輪輻，輪輻側面厚度為21 mm，整體重量約為7887.80 g，在受力的負荷下，經分析得知，總變形量約為0.013 mm、等效應力(von-Mises stress)為8.90 MPa，如圖6(a)、(b)所示，最大應力則發生於輪輻挖空之尖角處(紅標處)，如圖6(b)所示，相較於母材之降伏強度275 MPa，仍有可調變的空間，因此，接下來將針對設計變更後的輪圈進行分析。

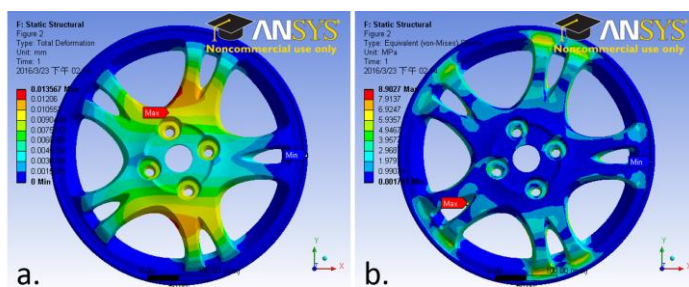


圖6 (a)總變形量為：0.013 mm (b)等效應力為：8.90 MPa

### 二、4支輪輻之結構應力分析

經設計變更為4支輪輻鋁合金輪圈，依相同受力參數進行模擬分析，其總變形量與von-Mises應力分別為：0.017 mm、11.59 MPa，如圖7(a)、(b)所示，而von-Mises應力最大值同樣位於尖角處，如圖7(b)所示，相較於原型輪圈可減重約348.12 g，減重比例約為4.4%，對於變形量與von-Mises應力而言，輪圈仍於母材降伏應力的範圍。

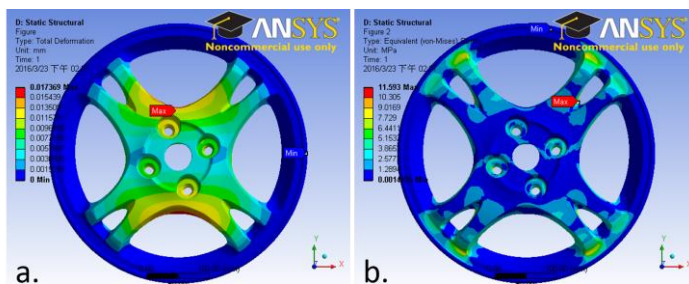


圖7 (a)總變形量為：0.017mm (b)等效應力為：11.59 MPa

### 三、3支輪輻之結構應力分析

3支輪輻之鋁合金輪圈，總變形量與von-Mises應力分別為：0.0264 mm、16.0 Mpa，如圖8(a)、(b)所示，而von-Mises應力最大值的位置會由原來的輪輻挖空尖角處轉移至與輪緣連接之圓角處，如圖8(b)所示，整體輪圈約可減重645.16 g，減重比例約為8.2%，但由von-Mises應力的增值而言，雖仍在安全的降伏應力範圍內，且減重近650 g，但應力值的變化已逾1倍，同時最大等效應力值的發生位置，亦轉移至對輪圈而言較具破壞性之靠近輪框處(紅標處)，因此，依分析3支輪輻之鋁合金輪圈將較不具應用之優勢。

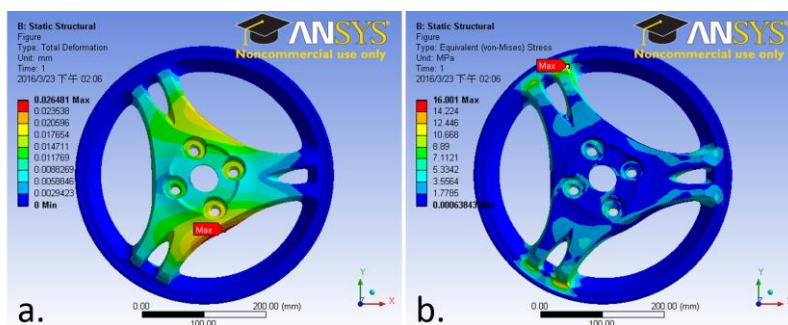





圖8 (a)總變形量為：0.026 mm (b)等效應力為：16.0 MPa

### 四、輪輻側面厚度之分析

經上述各節之分析得知，輪輻數量由原來的5支調整至3支時，其最大應力值，仍於6061-T6鋁合金之材料降伏強度容許值內，因此，接下來將進一步調變輪輻之側面厚度為減重的目標，亦即側面厚度由原來的21 mm降至15 mm，而調整為15 mm則為測試應力與應變之變化情形，同時亦接近市場上現有輻射狀輪圈之厚度。

在相同的外力負荷下，經分析得知，5支輪輻的總變形量由原型輪圈(輪輻側面厚度21 mm)的0.013 mm增加至0.027 mm、von-Mises應力由8.90 MPa增加至14.05 MPa；4支輪輻的部分，總變形量也由原本的0.017 mm增加至0.033 mm、von-Mises應力由11.59 MPa增加至15.43 MPa；而3支輪輻的總變形量由原本的0.026 mm增加至0.048 mm、von-Mises應力則由16.0 MPa增加至21.38 MPa，各輪輻結構分析比較，如表3所示。

表3 各輪輻結構分析總合表

	原型輪圈(5支)		4支輪輻		3支輪輻	
外觀						
輪輻肉厚(mm)	21 mm	15 mm	21 mm	15 mm	21 mm	15 mm
重量(g)	7887.80	7488.60	7539.68	7182.91	7242.64	6934.01
減重比(%)	--	5.0 %	4.4 %	8.9 %	8.1 %	12.0 %
體積(cm <sup>3</sup> )	2921.40	2773.55	2792.47	2660.33	2682.46	2568.15
總變形量(mm)	0.013	0.027	0.017	0.033	0.026	0.048
von-Mises應力(MPa)	8.90	14.05	11.59	15.43	16.0	21.38

就變形量而言，不管輪輻數為5支、4支或3支，以及輪輻側面厚度變化為何，其值的變化並不大，皆於安全的變形量範圍內，但觀察von-Mises應力的變化則增加情形相對明顯，尤其以3支輪輻(輪輻側面厚度15 mm)應力為21.38 MPa最為顯著，當然此現象起因於結構的改變所造成的必然情形，同時也因為輪輻數量的改變，造成最大應力位置的變化，為避免最大應力值位於輪框附近，造成設計上的不合理與輪框的破壞，明顯的3支輪輻的設計並不恰當。相對的，在容許之降伏應力、變形量與最大應力作用點的考量下，4支輪輻之設計較能符合減重之目標，因此，以4支輪輻之輪圈為設計標的(輪輻側面厚度15 mm)，於靜態負荷且符合降伏應力之規範下，將可有效減重約8.9%，合計約704.89 g，亦即輪圈之設計評估仍有調整空間，若以一台車四個輪圈而言，整車重量合計約可減少42.29 kg，將近一位成年人的重量，此對汽車油耗的表現將有相當大的助益，若以製造商而言，輕量化之輪圈亦可節省一筆可觀的材料成本支出。

## 肆、結論

本研究主要是透過逆向工程技術(RE)、電腦輔助設計(CAD)與電腦輔助分析(CAE)，針對市售之汽車鋁合金輪圈，進行一系列之原型重建與應力分析，並由設計的角度提出合理之輕量化修正方式，以本研究而言，在安全之應力規範內輪輻調整至4支且輪輻側面厚度降為15 mm時，能有效減重8.9%，更重要的是，在負荷下其最大等效應力值為15.43 MPa，亦即以材料之降伏強度值而言，即使再加入輪圈的溫度變化，仍可為安全之設計，以輪圈之靜力分析而言，本研究提供輪圈設計與輕量化之方向，日後如再配合動態分析，將可更強化結構之安全數據，同時能與製造的方式再做整合，如：旋壓工序或部份配合鍛造的製程，則可輕量化的量將更為可觀且更具安全性，提升台灣在汽車輪圈市場上的競爭力。

## 參攷文獻

- [1] 徐永珍 (2007)。鋁合金輪圈之製造法，**中華民國專利I277466**。臺北市：經濟部智慧財產局。
- [2] 王亭芳與洪瑞鴻(2007)。鋁合金輪圈體之製造方法及其製品，**中華民國專利I272980**。臺北市：經濟部智慧財產局。
- [3] Y. H. Kim, T. K. Ryou, H. J. Choi, and B. B. Hwang. (2002). An analysis of the forging processes for 6061 aluminum-alloy wheels, *Journal of Materials Processing Technology*, 123, 270–276.
- [4] E. Zitoun, and A. C. Reddy. (2005). *Applications of optimisation and reverse engineering solution strategies in the manufacturing of aluminium alloy products*, 105-111, National Conference on Computer Applications in Mechanical Engineering, Anantapur, India.
- [5] S. M. Paropate, and S. J. Deshmukh. (2013). Modelling and analysis of a motorcycle wheel rim, *International journal of mechanical engineering and robotics research*, 2, 148-156.
- [6] S. V. Deepak, C. Naresh, and S. A. Hussain. (2012). Modelling and analysis of alloy wheel for four wheeler vehicle, *International journal of mechanical engineering and robotics research*, 1, 72-80.
- [7] M. Kushal, and S. Sharma. (2015). Optimization of design of brake drum of two wheeler through approach of reverse engineering by using Ansys software, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12, 70–75.
- [8] D. S. Zhang, and Z. L. Lv. (2011). The Car Body Modeling Design by Reverse Engineering Techniques, *Energy Procedia*, 13, 1908-1911.
- [9] Q. Wang, Z. M. Zhang, X. Zhang, and G. J. Li. (2010). New extrusion process of Mg alloy automobile wheels, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 20, S599-S603.
- [10] C. L. Chang, and S. H. Yang. (2009). Simulation of wheel impact test using finite element method,

*Engineering Failure Analysis*, 16, 1711–1719.

[11] 胡惠文與王進富(2009)。鋁合金輪圈之碰撞分析，中華民國力學學會第三十三屆全國力學研討會論文集，苗栗市聯合大學。

[12] 洪志維(2004)。鋁合金輪圈強度之有限元素分析(碩士論文)。國立中央大學機械工程系研究所，桃園。